

УДК 533.17

Моделирование течения рабочего газа в цилиндрических каналах высоковольтных плазмотронов с газовихревой стабилизацией электрической дуги

А.М. Боровской

Свойства электрических дуг, горящих в цилиндрических каналах плазмотронов (генераторов низкотемпературной плазмы), ещё полностью не изучены. Поэтому в процессе исследования было промоделировано течение воздуха в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле или в смесительной камере плазмотронов и за их пределами (в окружающей среде). В итоге, было выполнено 3D-моделирование течения холодного плазмообразующего газа для исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока со стержневыми электродами в цилиндрических каналах.

PACS: 47.55.Ca

Ключевые слова: 3D-моделирование, течение, плазмообразующий газ, плазмотроны переменного тока.

Введение

Свойства электрических дуг, горящих в цилиндрических каналах плазмотронов (генераторов низкотемпературной плазмы), ещё далеко полностью не изучены. Но уже ясно, физические характеристики плазмотронов зависят от взаимодействий плазмообразующих рабочих газовых струй с электрическими дугами и от организации подачи плазмообразующих рабочих газов.

Особое место среди генераторов низкотемпературной плазмы занимают высоковольтные плазмотроны переменного электрического тока. Подобные установки мощностью до 50 кВт со стержневыми электродами, установленными в цилиндрических каналах плазмотронов, были разработаны и испытаны в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН) [1–6]. При этом проводился ряд экспериментальных и теоретических исследований в последние десятилетия не только в ИЭЭ РАН, но и в других научно-исследовательских учреждениях [7–11], в результате которых были определены внешние характеристики плазмотронов и физические параметры в их факелах [4]. Однако свойства электрических дуг, горящих в цилиндрических каналах плазмотронов, пока полностью ещё не изучены, хотя к настоящему времени, например, в ИЭЭ РАН выполнен большой объём исследований как

расчетно-теоретических [5], так и экспериментальных [6]. В то же время эффективность высоковольтных плазмотронов переменного тока, а также вопросы надёжности, устойчивости, обеспечения длительного срока непрерывной работы и особенно управления этими процессами [11], т.е. вопросы тщательного исследования течения холодного плазмообразующего газа, двигающегося в каналах исследуемых плазмотронов с дозвуковой скоростью, сохраняют свою актуальность. Решение всех этих проблем, конечно, невозможно без постановки комплекса экспериментальных и теоретических исследований, направленных на изучение детальных физико-химических процессов и выявления роли газодинамических и кинетических аспектов с целью построения полноценных физико-математических моделей, адекватно описывающих наблюдаемые явления.

Целью данной работы являлась попытка создания модели течений холодного газа (воздуха), подаваемого тангенциально для осевой стабилизации электрической дуги в канале плазмотронов, которую можно рассматривать как начальный этап моделирования совокупности физических процессов в каналах плазмотронов.

Моделирования течения холодного плазмообразующего газа в исследуемых плазмотронах

Объектами исследования являлись высоковольтные плазмотроны переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги, а именно, однофазный двухканальный и трёхфазный трёхканальный (рис. 1).

Исследуемые плазмотроны отличаются конструктивно: двухканальный плазмотрон имеет

Боровской Алексей Михайлович, инженер-исследователь. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН. Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18. Тел.: +7 (812) 5716293. E-mail: borovskoi.alex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 июня 2013 г.

© Боровской А.М., 2013

сужающуюся сопловую камеру, а трёхканальный – смесительную камеру постоянного диаметра. У этих плазмотронов идентичные электродные узлы, но они различаются только геометрическими размерами каналов. При этом стержневой электрод, входящий в электродные узлы этих плазмотронов, выполнен в форме тела вращения и имеет общую ось с каналом, в котором он устанавливается. Высоковольтные плазмотроны переменного тока, разработанные в ИЭЭ РАН, отличаются от других тем, что их внешний диаметр равен диаметру канала и стенка канала не является рабочей поверхностью электрода.

С целью моделирования процессов течения плазмообразующего рабочего газа использовалась программа GAMBIT, с помощью которой была построена сетка расчётной области. Кроме того, при моделировании применялась программа FLUENT для расчётов течения плазмообразующего рабочего газового потока с использованием модели турбулентности Spalart-Allmarès. В этих расчётах плотность плазмообразующего рабочего газа, т.е. воздуха, была определена по формуле идеального газа, а его вязкость – по формуле Са-

терленда с тремя коэффициентами, причем удельная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности и молярная масса этого плазмообразующего рабочего газа являлись постоянными величинами. В сечениях входных отверстий тангенциальной подачи, объединённых в одну поверхность, был задан массовый расход этого плазмообразующего рабочего газа в качестве граничных условий. Возвратные течения задавались на поверхностях окружающей среды, что учитывалось внешней сеткой программы GAMBIT, причём выбирались условия при температуре 293,15 К и нормальном атмосферном давлении (101325 Па). Было промоделировано течение воздуха в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле или в смесительной камере исследуемых плазмотронов и за их пределами, т.е. в окружающей среде.

С целью исследования физических процессов холодного продува в разных локальных областях исследуемых плазмотронов и за их пределами производилось построение полей скоростей плазмообразующего рабочего газа, а именно, модуля скорости, а также тангенциальной, ради-

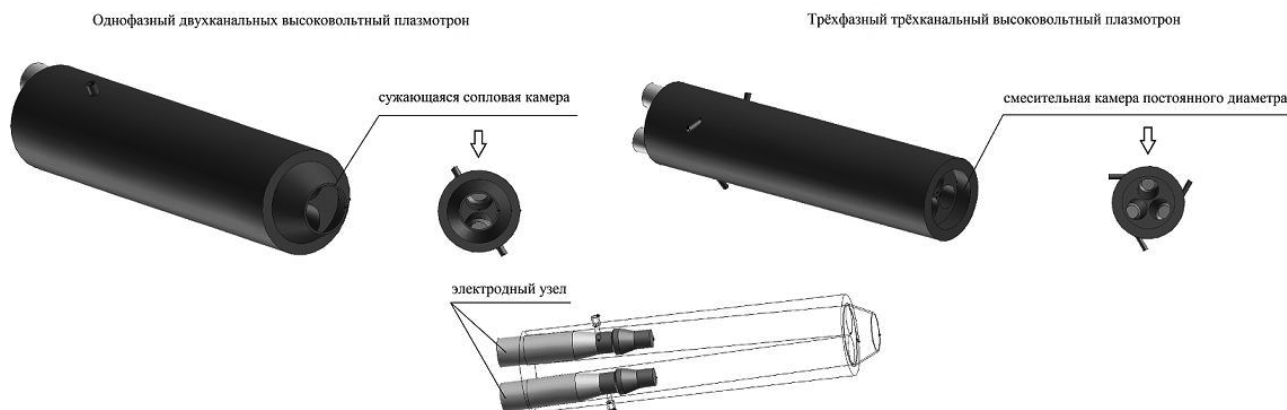


Рис. 1. Высоковольтные плазмотроны переменного тока с электродными узлами.

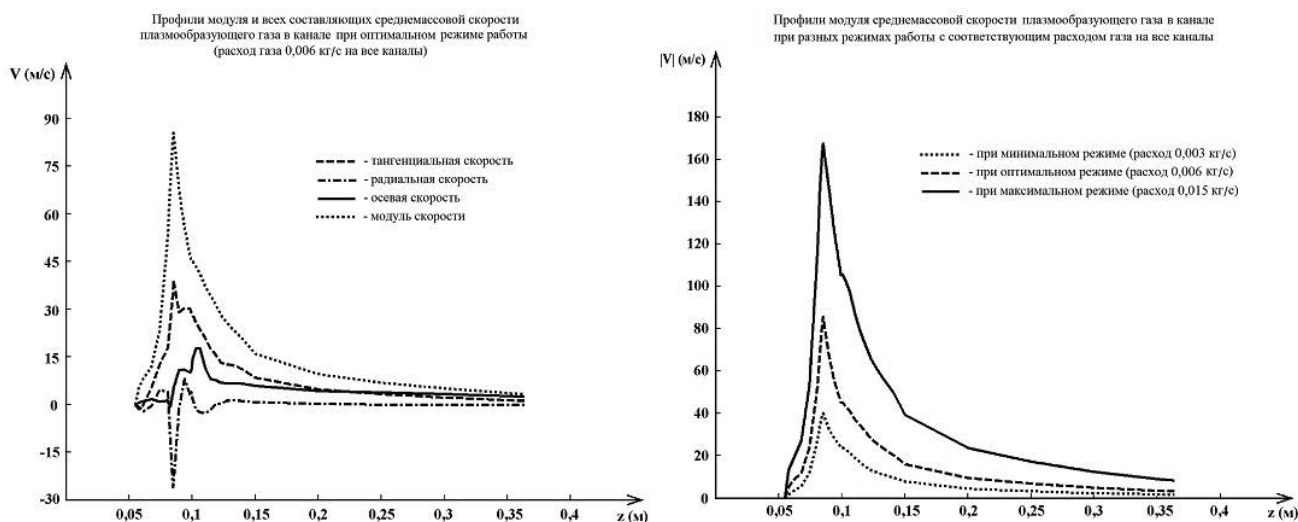


Рис. 2. Профили среднemasовых скоростей рабочего газа в канале двухканального плазмотрона.

альной и осевой составляющих скорости плазмообразующего рабочего газа в различных сечениях по продольной координате. Дополнительно были рассчитаны среднемассовые скорости плазмообразующего рабочего газа и построены их зависимости от продольной координаты, т.е. профили среднемассовых скоростей плазмообразующего рабочего газа (рис. 2 – 5).

Массовый расход рабочего плазмообразующего газа при этом в двухканальном плазмотроне составлял от 3 до 15 г/с, а в трёхканальном от 5 до 18 г/с, соответственно. Было выявлено, что модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа принимает максимальное значение в сечении канала, близком к тангенциальному вдуву (см. рис. 2 и рис. 3), и составляет от 40 до 170 м/с и от 40 до 135 м/с, соответственно, для двухканального и трёхканального плазмотронов. Наибольший вклад в этих условиях вносит среднемассовая тангенциальная составляющая скорости плазмообразующего рабочего газа, соответственно, равная от 15 до 65 м/с и от 30 до 90

м/с для двухканального и трёхканального плазмотронов. При этом стало очевидным, что минимальные значения среднемассового модуля скорости течения плазмообразующего рабочего газа наблюдаются в выходном сечении канала и составляют от 1,5 до 8,4 м/с и от 1,6 до 5,5 м/с для двухканального и трёхканального плазмотронов, соответственно. Наибольший вклад в этих условиях вносит среднемассовая осевая составляющая скорости плазмообразующего рабочего газа, соответственно, изменяющаяся от 1,2 до 6,2 м/с и от 1,4 до 4,9 м/с для двухканального и трёхканального плазмотронов.

Результаты исследования продемонстрировали, что заметное уменьшение среднемассового модуля скорости течения плазмообразующего рабочего газа наблюдается в каналах исследуемых плазмотронов по мере приближения к выходу и снаружи (в окружающей среде), т.е. от сужающегося сопла двухканального или от смешительной камеры трёхканального плазмотронов (см. рис. 4 и рис. 5). Максимальное значение принима-

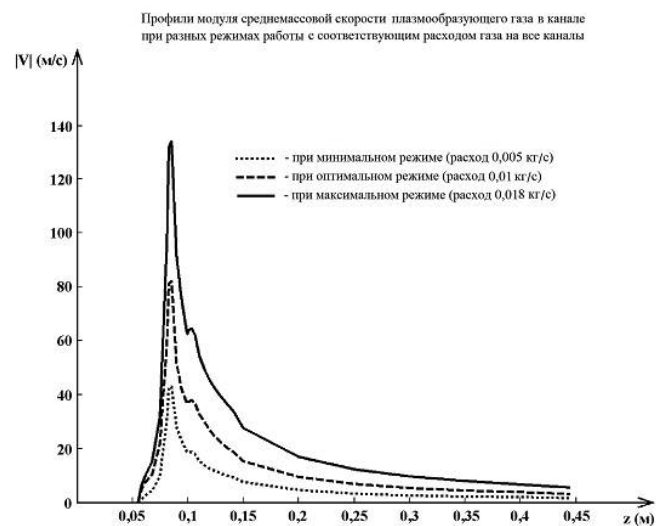
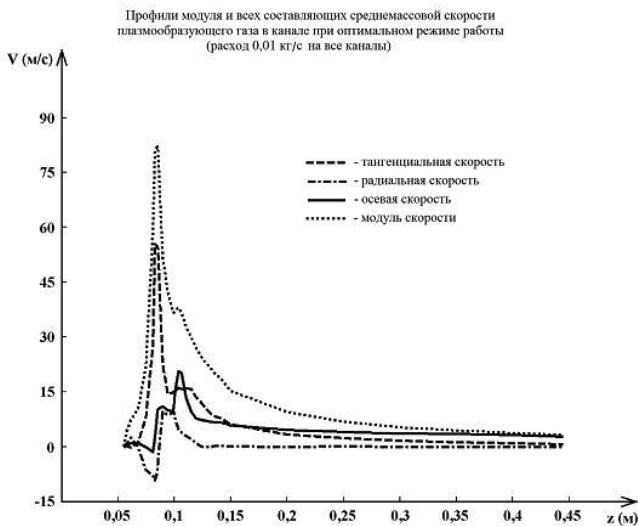


Рис. 3. Профили среднемассовых скоростей рабочего газа в канале трёхканального плазмотрона.

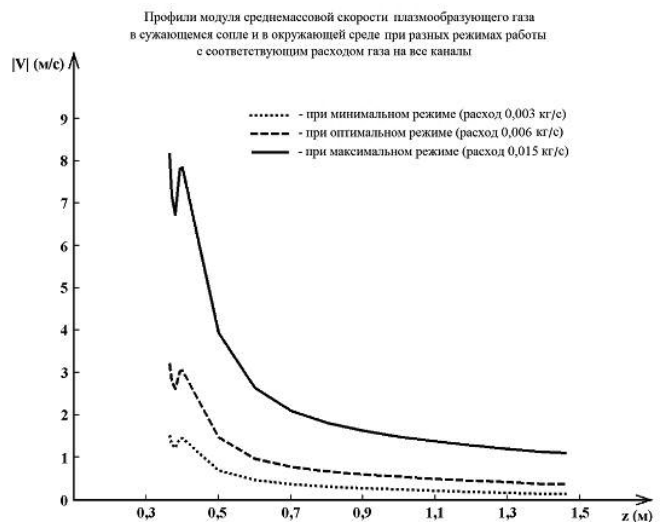
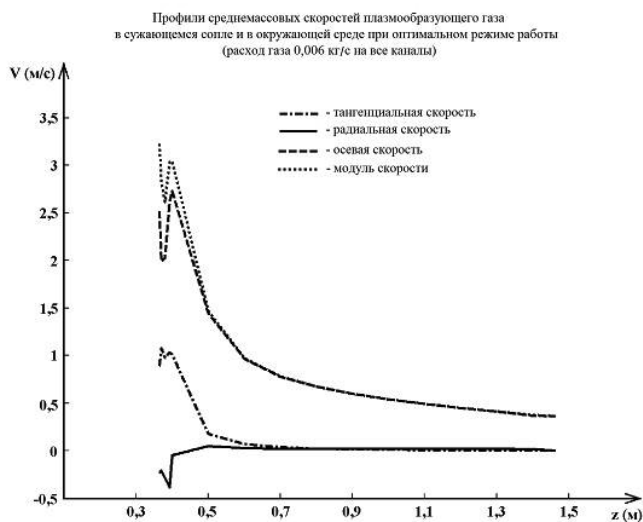


Рис. 4. Профили среднемассовых скоростей рабочего газа в сужающемся сопле двухканального плазмотрона и в окружающей среде.

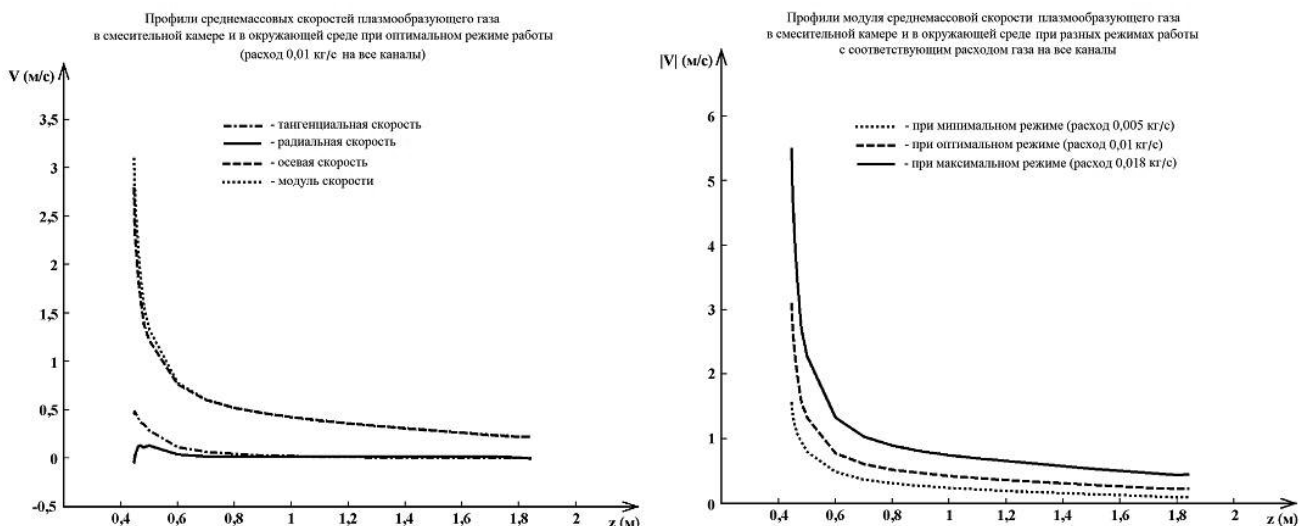


Рис. 5. Профили среднemasовых скоростей рабочего газа в смесительной камере трёхканального

плазмотрона и в окружающей среде.

ет модуль среднemasовой скорости плазмообразующего рабочего газа в этой ситуации в начальном сечении сужающегося сопла двухканального или в начальном сечении смесительной камеры трёхканального плазмотрона и составляет, соответственно, величины от 1,5 до 8,2 м/с и от 1,6 до 5,5 м/с для двухканального и трёхканального плазмотрона. Наибольший вклад в этих условиях вносит среднemasовая осевая составляющая скорости плазмообразующего рабочего газа, равная для двухканального и трёхканального плазмотрона, соответственно, значениям от 1,2 до 6,3 м/с и от 1,4 до 4,9 м/с.

В процессе моделирования выяснилось, что тангенциальная составляющая среднemasовой скорости плазмообразующего рабочего газа перестаёт вносить наибольший вклад в модуль среднemasовой скорости плазмообразующего рабочего газа в сечении канала исследуемых плазмотронах возле наконечника электродов, а далее наибольший вклад в модуль среднemasовой скорости плазмообразующего рабочего газа вносит его осевая составляющая. При этом среднemasовая тангенциальная скорость плазмообразующего рабочего газа не равна нулю, благодаря чему электрическая дуга не контактирует со стенками каналов исследуемых плазмотронах переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги, а также с их сужающимся соплом или с их смесительной камерой, защищая сужающиеся сопла, смесительные камеры и корпуса исследуемых плазмотронах от разрушения.

Заключение

В итоге моделирования были рассчитаны поля газодинамических параметров течения холодного плазмообразующего рабочего газа в каналах и за срезом сопла или смесительной камеры ис-

следуемых высоковольтных плазмотронах переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги со стержневыми электродами, а также были построены профили среднemasовых скоростей плазмообразующей рабочей газовой струи; было впервые выполнено 3D-моделирование течения холодного плазмообразующего газа для исследуемых плазмотронах. Полученные результаты выполненного этапа исследований позволяют планировать дальнейшее изучение и усовершенствование модели, учитывающей горение электрической дуги в канале исследуемых плазмотронах, а также выполнение численных расчётов параметров работающих высоковольтных плазмотронах переменного тока. При этом для согласования расчётных моделей будут использоваться экспериментальные данные, полученные при испытании действующих образцов плазмотронах с варьированием расхода плазмообразующего рабочего газа и мощности этих плазмотронах.

Литература

1. Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Попов С.Д., и др. // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 2. С. 205
2. Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Наконечный Г.В., и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2007. № 9. С. 77
3. Никонов А.В., Овчинников Р.В., Павлов А.В., и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008. Т. 51. № 11/3. С. 25
4. Рутберг Ф.Г., Павлов А.В., Попов С.Д., и др. // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 2. С. 193
5. Попов С.Д., Серба Е.О., Сузов А.В., Сузов А.В. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 50
6. Степанов Е.Ю., Долиновская Р.В., Шабалин С.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия наука и образование. 2012. № 3, часть 2. С. 110

7. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Лукашов В.П., и др. // ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН: сборник статей. Новосибирск. 1990. С. 3–46.

8. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., и др. // Низкотемпературная плазма. СО РАН. Институт теплофизики. 1999. Т. 17

9. Жуков М.Ф. // Низкотемпературная плазма. 2004. Т. 20. С. 15–25.

10. Жовтянский В.А. // Энерготехнологии и ресурсосбережение.. 2009. № 4. С. 97

11. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Чердниченко В.С., и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 4

Modelling of gas flow in the cylindrical channels of high-voltage plasma torches with vortex stabilization of the electric arc

A.M. Borovskoy

Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences;
18 Dvortsovaya emb., Saint-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: borovskoi.alex@mail.ru

The properties of electric arc, burning in the cylindrical channels of plasma torches (thermal plasma generators), is not fully understood, therefore, an attempt of gas flow simulation in the tangential feed areas in the cylindrical channel, in the tapering nozzle chamber or in the mixing chamber of plasma torches and outside (in the environment) is made; thus, 3D-modelling of the cold plasma-forming gas flow in cylindrical channels for high-voltage AC plasma torches with rod electrodes is performed for the first time.

PACS: 47.55.Ca

Keywords: 3D-modelling, gas flow, plasma gas, plasma torches, AC.

Bibliography — 11 references

Received June 10, 2013